

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Электроника негіздері

«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар», «Өндірістік электроника және басқару жүйелері» мамандықтары бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы

7 Дәріс

Тақырыбы: Ганн диоды. Зеннер диоды (Стабилитрон). Шоттки диоды. Туннельдік диодтар. Варикаптар

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Арнайы жартылай өткізгіш диодтардың (Ганн диоды, Зеннер диоды, Шоттки диоды, Туннельдік диод, Варикап) құрылымы, жұмыс істеу принципі және қолданылу салаларымен танысу.

Міндеттері:

1. Арнайы жартылай өткізгіш диодтардың (Ганн, Зеннер, Шоттки, Туннельдік, Варикап) құрылымы мен жұмыс принципін түсіндіру.
2. Диодтардың ерекшеліктері мен вольт-амперлік сипаттамаларын талдау.
3. Әр диодтың қолдану салаларын меңгеру және олардың функционалдық айырмашылықтарын түсіну.

Түйінді ұғымдар мен терминдер:

- Ганн диоды (Gunn diode)
- Теріс дифференциалды өткізгіштік (Negative differential resistance)
- Зеннер диоды / стабилитрон (Zener diode / Stabilatron)
- Зеннер кернеуі (Zener voltage)
- Шоттки диоды (Schottky diode)
- Шоттки тосқауылы (Schottky barrier)
- Туннельдік диод (Tunnel diode)
- Кванттық туннельдену (Quantum tunneling)
- Теріс дифференциалды кедергі аймағы (Negative resistance region)
- Варикап (Varicap / Varactor diode)
- Айнымалы сыйымдылық (Variable capacitance)
- СВЖ / АЖЖ (Супержоғары жиілік / Microwave frequency)

Дәріс жоспары

1. Ганн диоды
 2. Зеннер диоды (Стабилитрон)
 3. Шоттки диоды
 4. Туннельдік диодтар
 5. Варикаптар (Варикап диоды)
- Білімді бекітуге арналған сұрақтар
- Қорытынды
- Әдебиеттер тізімі

1. Ганн диоды

Ганн диоды — бұл ерекше жартылай өткізгіш құрылғы, оның басты ерекшелігі — p-n ауысуының болмауы. Ганн диодының жұмыс істеу механизмі кәдімгі p-n диодтардан өзгеше. Ол негативті дифференциалды өткізгіштік (negative differential resistance) құбылысына негізделген және СВЖ (супержоғары жиілік) сигналдарын генерациялай алады.

Бұл эффект 1963 жылы Джон Ганн (John Battiscombe Gunn) атты физиктің атымен аталған. Ол GaAs (галлий арсениді) сияқты кейбір жартылай өткізгіш материалдарда ерекше ток–кернеу сипаттамасын байқап, оны ғылыми түрде дәлелдеген.



Ганн диоды әдетте келесі материалдардан жасалады:

- ❖ GaAs (Галлий арсениді)
- ❖ InP (Индий фосфиді)
- ❖ CdTe (Кадмий теллуриді) — сирек

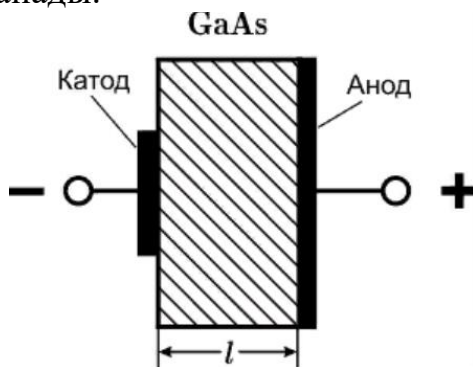
Бұл құрылғы жиі n-типті жартылай өткізгіштің бірнеше қабаттарынан тұрады. Ол ішінде ешқандай p-n ауысуы болмаса да, жоғары жиіліктегі тербелістерді өздігінен туғыза алады.

Жұмыс принципі:

Ганн диодының жұмысы Ганн эффектіне негізделген. Бұл эффект электрондардың жоғары энергия деңгейлеріне көшуі арқылы жүзеге асады.

Нақтырақ айтсақ:

1. Диодқа кернеу берілгенде, электрондар қозғала бастайды.
2. Белгілі бір кернеу шегінен кейін (шамамен 3 В), материалдың ішіндегі электрондар жоғарғы энергия деңгейіне секіреді (яғни, жылдамдығы төмен, бірақ массасы үлкен энергетикалық деңгейге өтеді).
3. Бұл кезде токтың өсуі баяулап, тіпті төмендейді — бұл теріс дифференциалды кедергі құбылысы деп аталады.
4. Осындай жағдайда диод ішінде тербелістер пайда болады, яғни СВЖ сигналдары генерацияланады.



Техникалық тұрғыдан:

- ❖ Теріс дифференциалды кедергі аймағында Ганн диод генератор ретінде жұмыс істей алады.

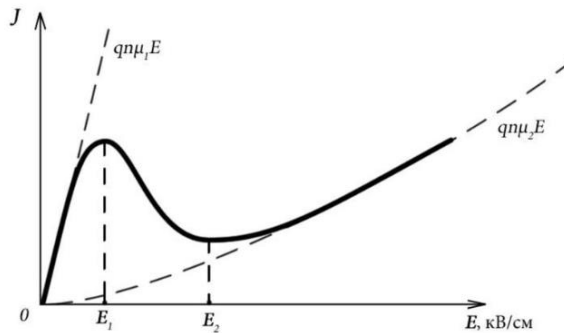
❖ Генерация жиілігі диодтың геометриясына, материал түріне және берілген кернеуге тәуелді болады (жиілік әдетте GHz диапазонында).

Вольт-амперлік сипаттамасы (I – V characteristics):

❖ Ганн диодының сипаттамасы қарапайым диодтардан өзгеше.

❖ Ток алдымен өседі, бірақ белгілі бір кернеуден кейін керісінше азаяды — бұл теріс кедергі аймағы.

❖ Бұл қасиет оны генератор немесе осциллятор ретінде қолдануға мүмкіндік береді.



Қолданылуы:

Ганн диодтарының басты артықшылығы — олардың АЖЖ (аса жоғары жиілік ГГц диапазонында) жұмыс істей алуы. Олар келесі салаларда кеңінен қолданылады:

1. Радар жүйелері:

❖ Көлік құралдарының жылдамдығын анықтау (мысалы, полиция радарлары).

❖ Әскери және әуежайлық радар жүйелерінде.

2. Сымсыз байланыс құрылғылары:

❖ АЖЖ-генераторлар ретінде.

❖ Қысқа қашықтықтағы сымсыз тарату құрылғыларында (мысалы, қозғалыс детекторлары).

3. Осцилляторлар мен генераторлар:

❖ Жоғары жиілікті сигнал көздері ретінде.

❖ Арнайы лабораториялық өлшеу құралдарында.

4. Ғылыми-зерттеу саласы:

❖ Жоғары жиілікті физикалық зерттеулерде, мысалы, плазма физикасында.

Артықшылықтары:

❖ Қарапайым құрылым (р-п ауысуы жоқ)

❖ Жоғары жиілікте жұмыс істей алады (бірнеше GHz дейін)

❖ Компактты және арзан

Кемшіліктері:

❖ Салыстырмалы түрде төмен тиімділік

❖ Температураға сезімтал

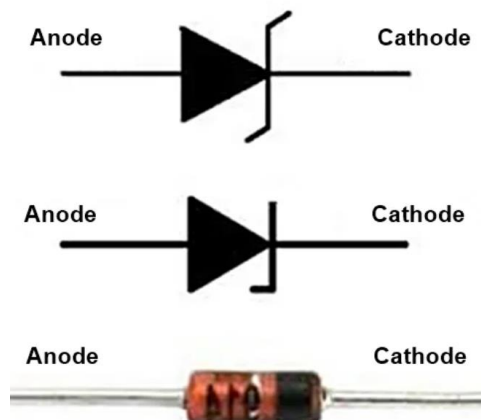
❖ Тек белгілі материалдармен жұмыс істейді (GaAs, InP)

2. Зеннер диоды (Стабилитрон)

Зеннер диоды, немесе стабилитрон, — бұл кері бағытта қосылған кезде кернеуді тұрақты ұстап тұруға арналған p-n ауысуы бар жартылай өткізгіш құрылғы.

Ол белгілі бір кері кернеу деңгейінен кейін кернеудің өзгеруіне тәуелсіз тұрақты кернеу береді. Бұл қасиеті оны кернеу тұрақтандырғыш ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Аты америкалық физик Кларенс Зеннердің атымен байланысты, ол бұл құбылысты алғаш рет теориялық тұрғыда сипаттаған.



Жұмыс принципі:

Зеннер диоды кері кернеу берілгенде жұмыс істейді. Яғни, анод теріс, ал катод оң потенциалда болады.

Жұмыс барысы:

1. Кері кернеу артқанда, бастапқыда диод ток өткізбейді.
2. Белгілі бір кернеу деңгейіне жеткенде (оны Зеннер кернеуі деп атайды), диод тосқауыл аймағы бұзылады.
3. Осы сәтте ток күрт артады, бірақ кернеу тұрақты болып қалады.
4. Бұл кернеу Зеннер әсері немесе лавиналық бұзылу нәтижесінде ұсталады.

Екі негізгі эффект:

❖ Зеннер эффектiсi (5 В-қа дейiн): төменгi кернеулерде, p-n ауысу арқылы туннель эффектiсiмен жүзеге асады.

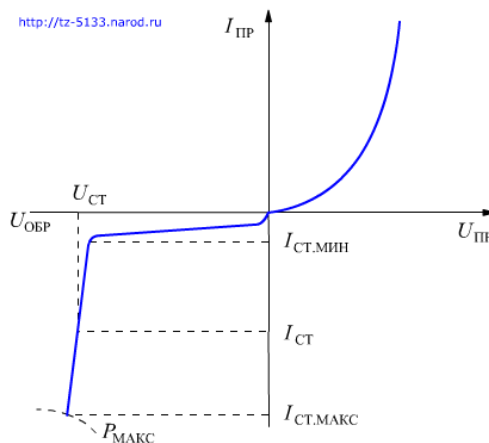
❖ Лавиналық эффект (5 В-тан жоғары): жоғары кернеулерде, еркін электрондар басқа атомдарды иондап, токты арттырады.

Техникалық тұрғыда "стабилитрон" – жалпы атау, ал "Зеннер диоды" нақты 5 В-тан төмен кернеулерге арналған түрі.

Вольт-амперлік сипаттамасы:

❖ Тік бағытта — кәдімгі диод сияқты жұмыс істейді: 0,7 В шамасында ток өтеді.

❖ Кері бағытта — Зеннер кернеуіне дейін ток өтпейді, ал одан кейін кернеу тұрақтанып, ток өседі.



Қолданылуы:

Зеннер диодтары кернеуді тұрақтандыру мен қорғау мақсаттарында кең қолданылады:

1. Кернеу тұрақтандырғыштар:
 - ❖ Электрондық құрылғыларға берілетін кернеуді бір деңгейде ұстау үшін.
 - ❖ Тұрақсыз қуат көздерінен құрылғыларды қорғау.
2. Қуат көздерінде:
 - ❖ Тұрақты 5В, 9В немесе 12В қажет болатын схемаларда (мысалы, микроконтроллерлерге арналған қорек көзі).
3. Қорғаныс элементі ретінде:
 - ❖ Жүйеге берілетін кернеу тым жоғары болған жағдайда, артық токты өткізіп, құрылғыны күйіп кетуден қорғайды.
4. Оптрон немесе компаратор схемаларында:
 - ❖ Шекті кернеуді анықтайтын белгі беру элементі ретінде.

Артықшылықтары:

- ❖ Қарапайым және арзан
- ❖ Сенімді және ұзақ қызмет етеді
- ❖ Кішкентай өлшемде тиімді жұмыс атқарады

Кемшіліктері:

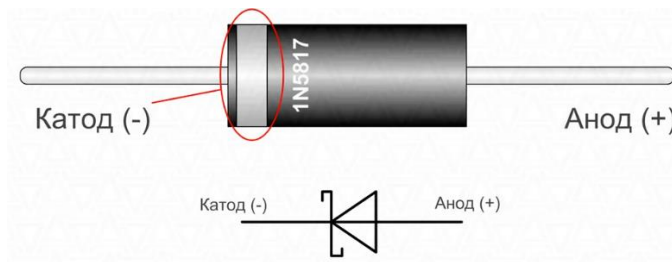
- ❖ Тек белгілі бір диапазонда кернеуді ұстап тұра алады
- ❖ Жоғары токтарда және температурада қызып кетуі мүмкін
- ❖ Тиімділігі төмен — қуаттың бір бөлігі жылу ретінде шығындалады

3. Шоттки диоды

Шоттки диоды — бұл кәдімгі диодтардан өзгеше, металл мен n-типті жартылай өткізгіш арасындағы шекарада құрылған құрылғы. Ол өзінің өте төмен кернеу түсуімен (forward voltage drop) және өте жылдам қалпына келу уақытымен (recovery time) ерекшеленеді.

Ол Шоттки тосқауылы деп аталатын физикалық құбылысқа негізделген және жоғары жиілікті электрондық құрылғыларда кеңінен қолданылады.

Аты неміс физигі Вальтер Шотткидің атымен байланысты.



Жұмыс принципі:

Құрылымы:

❖ Кәдімгі p-n ауысу орнына, металл мен n-типті жартылай өткізгіш арасында Шоттки тосқауылы (Schottky barrier) түзіледі.

❖ Бұл тосқауыл — электрондардың өткізу зонасынан тосқауыл арқылы өту процесі, ол туннельдік емес, бірақ өте аз энергия жұмсалатын процесс.

Негізгі сипаттамалары:

❖ Тікелей кернеу түсуі — шамамен 0.2–0.4 В (кәдімгі кремний диодтарында 0.7 В).

❖ Қалпына келу уақыты өте қысқа, сондықтан импульстік және жоғары жиілікті сигналдарды өңдеуде тиімді.

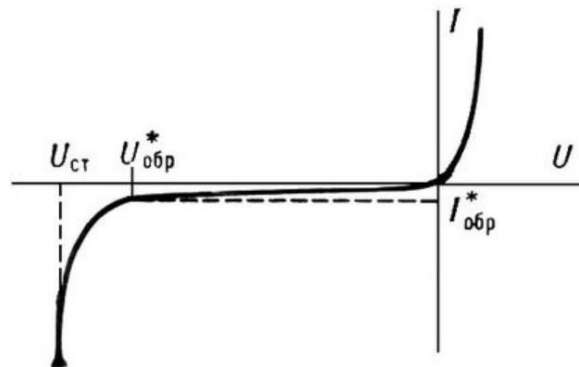
❖ Тік бағытта өткізгіштік жақсы, ал кері ток сәл жоғары болады (бұл минус болуы мүмкін).

Вольт-амперлік сипаттамасы (I – V сипаттамасы):

❖ Тік бағытта: аз кернеуде ток тез артады.

❖ Кері бағытта: ток өте аз, бірақ кәдімгі диодпен салыстырғанда кері ток сәл жоғары болуы мүмкін.

❖ Тосқауыл биіктігі мен материал типіне байланысты сипаттама өзгеруі мүмкін.



Қолданылуы:

1. Импульстік қуат көздерінде (SMPS):

❖ Жоғары жиілікті кернеу түзету үшін, өйткені олардың қалпына келу уақыты өте аз.

❖ Жоғары жиіліктегі импульстер кезінде диодтың тез өшуі мен қосылуы аса маңызды.

2. Түзеткіш схемаларда:

❖ Айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіретін схемаларда, төмен кернеу түсуі нәтижесінде қуат жоғалтуы азаяды.

❖ Ұялы телефон зарядтағыштарында, дербес қуат көздерінде.

3. Логикалық схемаларда:

- ❖ TTL логикасында жылдам кілт ретінде, өйткені олардың қалпына келу уақыты өте қысқа.

- ❖ "Clamping" және "protection" мақсатында.

4. Қуатты қорғау схемаларында:

- ❖ Кері кернеу мен артық токтан электронды компоненттерді қорғау үшін

4. Туннельдік диодтар

Туннельдік диод — күшті легіріленген, өте жұқа p-n ауысуына ие жартылай өткізгіш құрылғы. Оның ерекшелігі — кванттық туннельдену (quantum tunneling) құбылысына негізделген ток өткізгіштігі.

Бұл диод стандартты p-n диодтарынан ерекшеленеді, себебі оның жұмысында теріс дифференциалды кедергі аймағы байқалады, яғни белгілі бір кернеу диапазонында кернеу артқан сайын ток кемиді.



Жұмыс принципі:

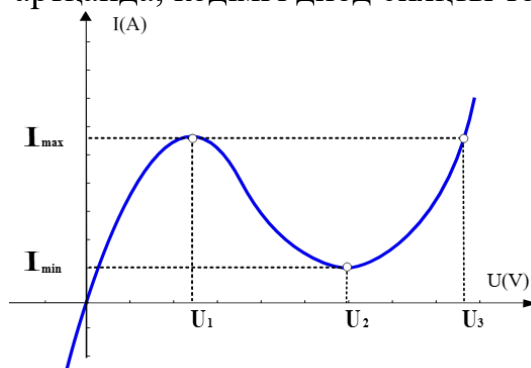
Кванттық туннельдену құбылысы:

- ❖ Классикалық физикада электрон тосқауылды жеңе алмайды, бірақ кванттық механикада электрон тосқауылды "тесіп" өтіп кетуі мүмкін — бұл туннельдену эффектісі.

- ❖ Туннельдік диодта p және n-аймақтар өте жұқа әрі күшті легіріленген, сондықтан туннельдену ықтималдығы жоғары болады.

Вольт-амперлік (I–V) сипаттамасы:

1. Кішкентай кернеу берілгенде, туннельдену күшейіп, ток тез артады.
2. Кернеу өскен сайын энергетикалық зоналардың сәйкес келуі жойылып, ток қайта төмендейді — бұл теріс кедергі аймағы.
3. Бұдан әрі кернеу артқанда, кәдімгі диод сияқты ток қайта өседі.



Қолданылуы:

1. АЖЖ (супержоғары жиілікті) генераторлар:

- ❖ Туннельдік диодтың жылдам әрекет етуі және теріс кедергі аймағы СВЖ генераторлар жасауға мүмкіндік береді.

- ❖ Сигналдарды миллиардтаған герц жиілікпен генерациялау үшін қолданылады.

2. Жоғары жылдамдықты күшейткіштер:

❖ Төмен кідіріс уақыты бар, сондықтан радио, радар, байланыс құрылғыларында күшейткіш ретінде пайдаланылады.

3. Ауыстырғыштар (switching elements):

- ❖ Логикалық элементтерде жылдам қосылып-өшу қабілеті жоғары.
- ❖ Сақиналы осцилляторлар мен релаксациялық генераторларда пайдаланылады.

5. Варикаптар (Варикап диоды)

Варикап немесе варикап — бұл арнайы мақсатқа арналған диод, оның р-п ауысуының сыйымдылығы кері кернеуге тәуелді өзгереді. Ол электрондық схемаларда айнымалы сыйымдылықты элемент (айнымалы конденсатор) ретінде қолданылады.

Варикап сөзі "вариабельді" (айнымалы) және "капаситанс" (сыйымдылық) сөздерінен құралған.

Жұмыс принципі:

Кері кернеу және сыйымдылық:

- ❖ Варикапқа кері кернеу берілген кезде, р-п ауысуының кеңдігі артады.
- ❖ Ауысу аймағы кеңейген сайын сыйымдылық азаяды, өйткені ол аймақ диэлектрик сияқты әрекет етеді.

Айнымалы конденсатор ретіндегі рөлі:

❖ Варикап жоғары жиілікті резонанстық тізбектерде (мысалы, LC контурларында) конденсатордың орнына қолданылады.

❖ Кері кернеуді өзгерту арқылы жиілікті баптауға болады.

Сыйымдылық пен кернеудің арасындағы байланыс қисығы:

- ❖ Бұл байланыс обратная экспоненциалды сипатта болады.
- ❖ Типтік жұмыс диапазоны: бірнеше пФ–ден (пикофарад) ондаған пФ-ге дейін.

Қолданылуы:

1. Радиоқабылдағыштар мен радиотаратқыштар:

- ❖ Жиілікті баптау немесе тон баптау үшін.
- ❖ Радио мен теледидар тюнерлерінде, автоматты жиілік баптау жүйелерінде (AFC).

2. Фазалық модуляторлар:

❖ Варикап арқылы фазаны басқару, мысалы, фазалық жиілік модуляциясында (PM, FM).

3. Фазалық детекторлар мен жиілік детекторлар:

❖ Жиілік өзгерісін сыйымдылықтың өзгерісі арқылы анықтайтын тізбектерде.

4. Жиілік синтезаторлар:

❖ PLL (фазалық ілеспе жүйелер) құрылымдарында варикаптар негізгі элементтердің бірі.

5. Автоматты реттеу құрылғылары:

❖ Варикаптар кернеу арқылы резонанстық жиілікті реттеуге мүмкіндік береді, бұл оларды автоматтандырылған радиокұрылғыларда кеңінен қолдануға себепші етеді.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар:

1. Ганн диодының р-п ауысуы болмауының ерекшелігі неде?
2. Ганн диоды қандай физикалық эффектке негізделген және қайда қолданылады?
3. Зеннер диодының негізгі қасиеті қандай және ол қалай жұмыс істейді?
4. Зеннер кернеуі және лавиналық эффект арасындағы айырмашылық неде?
5. Шоттки диодының артықшылығы мен қолданылу салалары қандай?
6. Туннельдік диодтың теріс дифференциалды кедергі аймағы қалай пайда болады?
7. Кванттық туннельдену құбылысы туннельдік диодта қалай көрінеді?
8. Варикап диодының сыйымдылығы кері кернеуге қалай тәуелді өзгереді?
9. Әр диодтың нақты қолдану салалары мен функционалдық артықшылықтарын атап беріңіз.
10. Ганн, Шоттки және туннельдік диодтар СВЖ құрылғыларында қандай рөл атқарады?

Қорытынды:

Электроникада арнайы диодтар — әртүрлі функцияларды атқаратын маңызды элементтер. Бұл лекцияда қарастырылған:

- ❖ Ганн диоды — СВЖ сигналдарын генерациялау үшін,
- ❖ Зеннер диоды — кернеуді тұрақтандыру үшін,
- ❖ Шоттки диоды — жоғары жиілікті және жылдам тізбектер үшін,
- ❖ Туннельдік диод — теріс кедергі арқылы күшейту мен генерация үшін,
- ❖ Варикап — жиілікті баптау мен басқару үшін қолданылады.

Олардың әрқайсысы құрылымдық жағынан ерекше және нақты қолдану саласына бейімделген. Бұл элементтер — заманауи радиоэлектроника мен автоматика жүйелерінің негізгі құрамдас бөліктері.

Әдебиеттер тізімі:

1. Бояркин П. И. – Электроника: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2010.
2. Седра А., Смит К. – Микроэлектронные схемы. – М.: Бином, 2017.
3. Нейман К., Электронные приборы и устройства. – М.: Радио и связь, 2009.
4. Горюнов В. И. – Полупроводниковые приборы и интегральные схемы. – СПб: Питер, 2012.
5. Қ. Жүнісбеков, Б. Сапарғалиев – Электроника негіздері. – Алматы: Қазақ университеті, 2018.
6. М. Қ. Әлімжанов – Жартылай өткізгіштер физикасы және электроника элементтері. – Алматы: Білім, 2015.
7. Millman J., Halkias C. – Electronic Devices and Circuits. – McGraw-Hill Education, 2007.
8. Floyd T. L. – Electronic Devices. – Pearson Education, 2020.